

#2
a/b
21/4/00JC978 U.S. PRO
09/992583

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

20 SEP. 2001

Fait à Paris, le

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE
26 bis, rue de Saint Petersburg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04
Télécopie : 33 (1) 42 93 59 30
www.inpi.fr

THIS PAGE BLANK (USPIC)



26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



REQUÊTE EN DÉLIVRANCE 1/2

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

08 540 W / 260699

Remise des pièces DATE 15 NOV 2000 LIEU 75 INPI PARIS N° D'ENREGISTREMENT 0014733 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI 15 NOV. 2000		1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE BUREAU D.A. CASALONGA-JOSSE 8, Avenue Percier 75008 PARIS	
Vos références pour ce dossier (facultatif) B 00/2322 FR - GK			
Confirmation d'un dépôt par télécopie <input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie			
2 NATURE DE LA DEMANDE		Cochez l'une des 4 cases suivantes	
Demande de brevet		<input checked="" type="checkbox"/>	
Demande de certificat d'utilité		<input type="checkbox"/>	
Demande divisionnaire		<input type="checkbox"/>	
<i>Demande de brevet initiale</i>		N° _____ Date : / /	
<i>ou demande de certificat d'utilité initiale</i>		N° _____ Date : / /	
Transformation d'une demande de brevet européen <i>Demande de brevet initiale</i>		<input type="checkbox"/>	
		N° _____ Date : / /	
3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) Procédé et système de commande d'un élément à retour d'effort.			
4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE		Pays ou organisation _____ N° _____ Date : / / Pays ou organisation _____ N° _____ Date : / / Pays ou organisation _____ N° _____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
5 DEMANDEUR		<input type="checkbox"/> S'il y a d'autres demandeurs, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
Nom ou dénomination sociale		France Télécom	
Prénoms			
Forme juridique		Société Anonyme	
N° SIREN			
Code APE-NAF			
Adresse	Rue	6, place d'Alleray	
	Code postal et ville	75015	PARIS
Pays		FRANCE	
Nationalité		Française	
N° de téléphone (facultatif)			
N° de télécopie (facultatif)			
Adresse électronique (facultatif)			

**BREVET D'INVENTION
CERTIFICAT D'UTILITÉ**

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE 2/2

REMISE DES PIÈCES DATE 15 NOV 2000 LIEU 75 INPI PARIS N° D'ENREGISTREMENT 0014733 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		Réservé à l'INPI	DB 540 W / 190600
Vos références pour ce dossier : <i>(facultatif)</i>		B 00/2322 FR	
6 MANDATAIRE Nom Prénom Cabinet ou Société N ° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel Adresse Rue Code postal et ville N° de téléphone <i>(facultatif)</i> N° de télécopie <i>(facultatif)</i> Adresse électronique <i>(facultatif)</i>		BUREAU D.A. CASALONGA-JOSSE 8, Avenue Percier 75008 PARIS	
7 INVENTEUR (S)		<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Dans ce cas fournir une désignation d'inventeur(s) séparée	
8 RAPPORT DE RECHERCHE		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)	
Établissement immédiat ou établissement différé		<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Paiement échelonné de la redevance		Païement en deux versements, uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention <i>(joindre un avis de non-imposition)</i> <input type="checkbox"/> Requête antérieurement à ce dépôt <i>(joindre une copie de la décision d'admission pour cette invention ou indiquer sa référence) :</i>	
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes			
10 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI P. BERNOUIS	

**BREVET D'INVENTION****CERTIFICAT D'UTILITÉ**

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11235*02

DÉPARTEMENT DES BREVETS26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08


Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 94 86 54

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° .1./..1

(Si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

08 113 W / 260899

Vos références pour ce dossier (facultatif)		B 00/2322 FR	
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL		00 14 733	
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)			
Procédé et système de commande d'un élément à retour d'effort.			
LE(S) DEMANDEUR(S) :			
Société Anonyme dite : France Télécom			
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) : (Indiquez en haut à droite «Page N° 1/1» S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez un formulaire identique et numérotez chaque page en indiquant le nombre total de pages).			
Nom		HENNION	
Prénoms		Bernard	
Adresse	Rue	1536, Route de Chamrousse	
	Code postal et ville	38140	ST MARTIN D'URIAGE
Société d'appartenance (facultatif)			
Nom			
Prénoms			
Adresse	Rue		
	Code postal et ville		
Société d'appartenance (facultatif)			
Nom			
Prénoms			
Adresse	Rue		
	Code postal et ville		
Société d'appartenance (facultatif)			
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)		Paris, le 15 Novembre 2000.  A. CASALONGA (bm 92-1044i) Conseil en Propriété Industrielle	

Procédé et système de commande d'un élément à retour d'effort.

La présente invention relève du domaine de la transmission de retour d'effort à distance, notamment dans le cadre du développement de mondes virtuels répartis et du développement de moyens de téléprésence.

De la même façon que les techniques de codage de vidéo
5 numérique s'appuient sur les connaissances de la perception visuelle, et les techniques de reconnaissance vocale sur les connaissances de l'ouïe, les techniques haptiques (du grec haptos : la main) s'appuient sur les connaissances des gestes.

Il existe deux sortes de gestes fins réalisables avec la main : les
10 gestes balistiques, comme déplacer la main vers un verre pour le saisir et les gestes avec contre-réactions du toucher, comme celui qui permet après saisie du verre et fermeture de la pince pouce-doigts, de porter le verre à sa bouche. Le cerveau est alors informé en permanence de la force avec laquelle la main enserre le verre, de son poids qui dépend de la quantité de
15 liquide. Le cerveau réagit alors en donnant l'ordre moteur de "pincer" suffisamment ce verre pour qu'il ne tombe pas, mais pas trop toutefois, pour ne pas le casser, ni dépenser une énergie inutile.

Les gestes balistiques activent l'arc moteur mais ils n'activent pas l'arc sensitif en retour du toucher. Le retour d'informations peut être
20 une représentation visuelle de l'espace, mais aussi une carte gestuelle, c'est-à-dire une représentation mentale apprise ou innée câblée dans le cerveau et qui génère automatiquement la séquence des ordres moteurs des muscles de l'épaule, du bras, de la main pour réaliser ce geste balistique en fonction d'une certaine représentation mentale de l'espace,
25 notamment de la distance présumée main-verre.

Pour les gestes balistiques, il est suffisant de transmettre au cerveau les informations sur le geste avec une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. Cela signifie que si on envoie un échantillon du signal toutes les 10 ms, le signal transmis contiendra toute
 5 l'information pertinente du geste balistique.

Les gestes avec contre-réactions du toucher activent en même temps l'arc moteur et l'arc sensitif. Le cerveau ferme la boucle et le cycle complet chez l'homme dure moins de 1 ms. La bande passante des neurones sensitifs situés dans les bouts des doigts, c'est-à-dire la fréquence
 10 maximale du signal mécanique que ces neurones sont capables de détecter et de transmettre au cerveau, est supérieure à 500 Hz. Si on veut pouvoir coder dans un ordinateur un geste fin, il faut que le système à retour d'efforts utilisé ait lui-même une fréquence de fonctionnement élevée, au moins égale, d'après le théorème de Shannon, au double de la bande
 15 passante des doigts.

Dans la pratique, les systèmes à retour d'efforts sur une machine locale fonctionnent à une fréquence typique de 1 KHz en boucle fermée locale, c'est-à-dire qu'une rétroaction est calculée puis exercée sur leurs moteurs puis perçue par la main toutes les 1/1000 de seconde. Cela permet
 20 d'éviter l'effet dit de la "brosse à dents électrique" : l'instrument que l'on tient en main ne doit pas donner l'impression de vibrer.

Cette fréquence de 1 KHz résulte du compromis suivant : elle ne doit être ni trop basse pour pouvoir restituer finement l'impression tactile, ni trop haute pour laisser suffisamment de temps à l'ordinateur pour
 25 calculer la force de contre-réaction qui va représenter, dans le monde virtuel mécanique, la simulation fine du geste effectué.

Si maintenant on désire transmettre via un réseau de télécommunications, des gestes fins codés par le système à retour d'efforts et des gestes fins avec contre-réactions, le problème se complique du fait
 30 de la latence généralement bien supérieure introduite par le réseau lui-même.

Ainsi, la latence en technologie RNIS est de 30 ms, en technologie ADSL de l'ordre de 200 ms, et sur Internet elle peut atteindre 6 s ou même provoquer le rejet pur et simple du message. Sur ADSL et
 35 Internet, la latence varie du fait de la nature asynchrone des réseaux. La

cadence de 1 KHz est donc beaucoup trop élevée pour pouvoir être maintenue si la boucle fermée inclut un aller-retour via le réseau - le geste est codé puis transmis via le réseau, il est appliqué à un objet distant, la contre-réaction de cet objet est à son tour codée et transmise en retour via le réseau -.

Un geste balistique peut être transmis avec un retard de l'ordre de grandeur de 10 ms. En effet, la vue est un sens monodirectionnel : l'oeil est une sorte de caméra enregistrant une scène et le cerveau, à une tolérance près, peut percevoir avec un léger retard le film visuel précis sans perturber l'exécution du geste.

Au contraire, un geste fin avec contre-réaction nécessite de boucler en moins d'une milliseconde, l'aller-retour de décision de l'intensité de la force à exercer :

- émission de l'ordre au muscle via l'arc sensitif moteur,
- action mécanique de la main sur le verre,
- sensation du toucher du verre (augmentation de la pression de contact) au niveau des bouts des doigts, et
- retour vers le cerveau via l'arc sensitif tactile de cette information pour permettre au cerveau de décider l'ajustement de la force de la "pince".

Pour tenter de transmettre néanmoins un tel geste fin, il existe une méthode dite Méthode "Wavetransform", publiée par John Wilson, Neville Hogan du MIT sous le titre "Algorithms for Network - Based Force Feedback", Fourth PHANTOM Users Group Workshop (PUG 99). Cette méthode simule le retard introduit par le réseau par une viscosité artificielle qui stabilise la boucle de contre-réaction : le système est d'autant plus visqueux que le réseau introduit un grand retard.

La méthode "Wavetransform" consiste à transposer dans l'espace forces/vitesses la théorie des quadripôles passifs à retard pur qui est bien connue pour les grandeurs électriques tension/intensité. Cette théorie permet de calculer les ondes électriques incidentes et réfléchies en fonction de l'impédance caractéristique de la ligne. La transmission du signal électrique est optimale lorsque cette ligne est fermée sur cette même valeur caractéristique de l'impédance.

La loi d'Ohm $U=Z \cdot I$ se transpose dans l'espace mécanique en la

loi $F = \text{viscosité} * \text{Vitesse}$ et la méthode "Wavetransform" consiste à adapter une ligne à retard pure virtuelle en lui donnant comme impédance (viscosité en fait) caractéristique celle du robot télémanipulé. Le signal est transmis sous la forme de sa transformée en Z, $S(z) = \sum (s(t) * e^{(2i * \pi * n * T)})$ où T est le délai fixe du réseau. Plus le réseau introduit un grand retard, et plus il faut rajouter une grande viscosité artificielle dans la ligne pour stabiliser la simulation mécanique répartie du geste fin en boucle fermée et en réseau.

On déforme certes la sensation gestuelle, mais on optimise la transmission du signal utile. Cette méthode a été publiée au Fourth Users Group Workshop (PUG99).

La méthode "Wavetransform" nécessite un réseau synchrone, c'est-à-dire un réseau à retard fixe et connu, par exemple RNIS. Elle est basée sur la représentation en Z des signaux discrets échantillonnés de période égale à ce délai fixe connu du réseau.

Elle est donc inapplicable sur les réseaux asynchrones à messages du type Internet ou ATM, UMTS, qui se caractérisent par un délai de transmission variable, et un rejet si le message se perd ou met trop de temps à traverser le réseau.

Le problème de la cadence trop élevée des systèmes à retours d'efforts est exacerbé sur ces réseaux asynchrones, pour lesquels :

- les messages peuvent se perdre, ne pas aboutir, ou être rejetés si l'accusé de réception tarde trop (TCP/IP),
- les messages qui arrivent à bon port mettent un délai variable pour traverser le réseau,
- ils n'arrivent pas forcément dans l'ordre où ils ont été émis,
- il n'existe pas d'horloge commune exacte à la milliseconde près entre deux machines.

L'invention propose de remédier aux inconvénients des systèmes de l'art antérieur.

L'invention propose un système de commande d'un élément à rétroaction situé à distance susceptible de fonctionner avec transmission de données sur réseaux synchrones ou asynchrones, de retard connu ou indéterminé.

Le système de commande, selon un aspect de l'invention, est

destiné à un élément à retour d'effort apte à interagir avec un autre élément, du type à constante de temps inférieure à celle liée à une commande à distance. Le système comprend un modèle local pour le calcul d'une consigne destinée à l'élément à retour d'effort à partir d'une variable mesurée par l'élément à retour d'effort, de variables intrinsèques à l'élément à retour d'effort et d'une estimation d'une interaction extérieure sur l'élément à retour d'effort, et d'une variable d'état de l'élément à retour d'effort, un modèle distant pour l'estimation des interactions et des variables d'état de l'autre élément avec mise à jour lors de la réception de données reçues d'un autre système situé à distance, et un moyen de recalage apte à émettre un message de recalage vers ledit autre système.

On effectue ainsi une simulation locale du comportement de l'élément distant.

Avantageusement, le système comprend un modèle fantôme pour effectuer une estimation des variables d'état de l'élément à retour d'effort et recalcul ladite estimation à réception du message de recalage. Le modèle fantôme permet de simuler localement le modèle distant du système de commande distant.

Dans un mode de réalisation de l'invention, le moyen de recalage comprend un moyen de comparaison de l'estimation des variables d'état provenant du modèle fantôme et de variables d'état provenant du modèle local de façon qu'en cas de différence supérieure à un seuil prédéterminé, le moyen de recalage émette un message de recalage vers le modèle fantôme et vers l'autre système.

Dans un mode de réalisation de l'invention, le système comprend un moyen d'extrapolation pour traiter un message de recalage provenant de l'autre système et pour mettre à jour le modèle distant.

L'invention propose également un ensemble de commande de deux éléments à retour d'effort situés à distance l'un de l'autre. Chaque élément est pourvu d'un système de commande comprenant un modèle local pour le calcul d'une consigne destinée à l'élément à retour d'effort à partir d'une variable mesurée par l'élément à retour d'effort, de variables intrinsèques à l'élément à retour d'effort et d'une estimation d'une interaction extérieure sur l'élément à retour d'effort, et d'une variable d'état de l'élément à retour d'effort, un modèle distant pour l'estimation

des interactions et des variables d'état de l'autre élément avec mise à jour lors de la réception de données reçues d'un autre système situé à distance, et un moyen de recalage apte à émettre un message de recalage vers ledit autre système.

5 L'invention propose également un procédé de commande d'un élément à retour d'effort apte à interagir avec un autre élément, dans lequel on effectue une modélisation locale pour obtenir une consigne destinée à l'élément à retour d'effort à partir d'une variable mesurée par ledit élément à retour d'effort, de variables intrinsèques audit élément
10 à retour d'effort, d'une estimation d'une interaction extérieure sur l'élément à retour d'effort, et d'une variable d'état de l'élément à retour d'effort; on effectue une modélisation distante des interactions et des variables d'état de l'autre élément avec mise à jour lors de la réception de données reçues d'un autre système situé à distance; on élabore et on émet vers ledit autre
15 système un message de recalage.

Avantageusement, on effectue une modélisation fantôme des variables d'état de l'élément à retour d'effort avec recalage à réception du message de recalage.

Dans un mode de réalisation de l'invention, lors du recalage, on
20 compare l'estimation de variables d'état issues de la modélisation fantôme et de variables d'état issues de la modélisation locale de façon qu'en cas de différence supérieure à un seuil prédéterminé, on émette un message de recalage en vue d'une nouvelle modélisation fantôme, et vers l'autre système.

25 Dans un mode de réalisation de l'invention, on effectue une extrapolation pour traiter un message de recalage provenant de l'autre système et effectuer une mise à jour de la modélisation distante.

L'invention concerne également un programme d'ordinateur comprenant des moyens de code programme pour mettre en œuvre les
30 étapes du procédé, lorsque ledit programme fonctionne sur un ordinateur.

L'invention concerne également un support capable d'être lu par un dispositif de lecture de moyens de code programme qui s'y trouvent stockés et qui sont aptes à la mise en œuvre des étapes du procédé, lorsque ledit programme fonctionne sur un ordinateur.

35 La présente invention s'applique de façon avantageuse à des

systèmes bidirectionnels, par exemple des jeux vidéo avec poignées de commande pourvues d'actionneurs pour le retour d'effort, à la télé-échographie robotisée qui peut être utilisée dans le domaine de l'obstétrique et des examens abdominaux.

5 Dans le cas de l'échographie, la peau du patient ou de la patiente est généralement enduite d'un gel pour une transmission convenable des ultra sons. La sonde échographique pourra être manipulée à distance par un opérateur. En raison de la présence du gel, les composantes de force exercée par le patient ou la patiente sur la sonde peuvent être considérées
10 comme normales à la surface locale de la peau. La sonde possède 6 degrés de liberté avec une contre réaction de force selon les trois axes d'un repère tridimensionnel et une contre réaction de couple également selon les trois axes d'un repère tridimensionnel. Le système peut également s'appliquer à des jeux de combat à distance, d'escrime, ou encore à des applications
15 industrielles du genre télé-usinage.

La présente invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description détaillée de quelques modes de réalisation pris à titre d'exemple nullement limitatifs et illustrés par les dessins annexés, sur lesquels :

20 la figure 1 est une vue schématique d'un système selon un premier mode de réalisation de l'invention.

la figure 2 est une vue détaillée de la figure 1.

la figure 3 montre les courbes d'évolution de certains paramètres du système.

25 la figure 4 est une vue schématique d'un second mode de réalisation de l'invention.

Comme on peut le voir sur la figure 1, un ensemble de jeux où des joueurs J1 et J2 comparent leur force à distance - jeu souvent appelé "bras de fer" - comprend une poignée P1 pour le joueur J1 et une poignée P2 pour
30 le joueur J2. Chaque poignée P1, P2 est reliée à une interface I1, I2 comprenant un moyen pour exercer une force sur la poignée P1, P2, par exemple un actionneur du genre vérin électrique, et un moyen pour mesurer la force exercée par le jour J1, J2 sur la poignée P1, P2, par exemple un capteur de couple ou encore une jauge de contrainte.
35 L'interface I1, I2 comprendra également une carte d'acquisition reliée au

moyen d'exercice d'une force et au moyen de mesure et capable d'échanger des données numériques avec un autre système numérique tel qu'un ordinateur.

5 Chaque interface I1, I2 est reliée à un système de commande S1, S2. Dans le cas illustré ici, les systèmes S1 et S2 sont identiques. Seul le système S1 sera décrit. Toutefois, on peut envisager des modes de réalisation dans lesquels l'un des deux systèmes est de structure simplifiée par rapport à l'autre.

10 De façon générale, le système S1 peut se présenter sous la forme d'un ordinateur, du genre ordinateur personnel généralement pourvu d'au moins un micro-processeur, de mémoires rémanente et non rémanente, d'un bus de communication, de ports d'entrée et de sortie et d'un ou plusieurs logiciels stockés en mémoire et aptes à être exécutés par le micro-processeur.

15 Le système S1 est relié d'une part à l'interface I1 par exemple par un bus de type RS 232 et au système S2 par un réseau de communication référencé 3 dans son ensemble et qui pourra être de type synchrone par exemple RNIS ou asynchrone, de type ATM, UMTS ou encore Internet (TCP/IP). Le système S1 est situé à proximité du joueur J1, par exemple
20 dans la même pièce. Le système S2 est situé à distance du système S1, distance qui peut aller de quelques mètres à quelques milliers de kilomètres. En d'autres termes, le système S1, l'interface I1, la poignée P1 et le joueur J1 sont disposés de façon locale tandis que le système S2, l'interface I2, la poignée P2 et le joueur J2 sont disposés de façon distale
25 par rapport aux précédents.

 Plus précisément, le système S1 comprend un modèle local ML1 apte à envoyer une consigne à l'interface I1 et à recevoir de ladite interface I1 une variable mesurée par l'interface I1, par exemple la position X de la poignée P1. La consigne peut être une variable de force ou de couple et est
30 notée F_e . Le système S1 comprend un modèle distant MD2 prévu pour estimer un état du modèle local ML2 du système S2. Le modèle distant MD2 du système S1 est apte à recevoir des données en provenance du système S2, à recevoir des données en provenance du modèle local ML1 et à émettre des données vers le modèle local ML1. Plus particulièrement, le
35 système S1 comprend un extrapolateur EXT2 recevant des données en

provenance du système S2 par l'intermédiaire du réseau de communication 3 pour traiter un message de recalage provenant du système S2 et transmettre des données de mise à jour au modèle distant MD2 en fonction du message de recalage reçu en dernier.

5 Le système S1 comprend un écran E1 relié au modèle local ML1 pour l'affichage de données issues du modèle local ML1, par exemple une courbe retraçant l'évolution des forces exercées et des positions des poignées P1 et P2.

10 Le système S1 comprend un recaleur R1 recevant des données du modèle local ML1 et apte à envoyer des données de sortie à destination du système S2, en particulier à destination de l'extrapolateur EXT1 du système S2. Le recaleur R1 est apte à effectuer une préparation de données pour les émettre sous la forme d'un message de recalage qui pourra comprendre une date, la position X de la poignée P1, la force F exercée sur la poignée P1 à ladite date ainsi que la force exercée sur la poignée P1 à une date antérieure.

15 Le système S1 comprend, en outre, un modèle fantôme MF1 qui reçoit également les messages de recalage en provenance du recaleur R1 du système S1 et qui effectue une estimation des variables d'état de l'interface I1 d'après les messages de recalage émis par le recaleur R1 et reçu par le système S2. En d'autres termes, le modèle fantôme MF1 effectue une estimation d'après les mêmes données que celles reçues par le modèle distant MD1 du système S2. Ainsi, le modèle fantôme MF1 permet de modéliser les variables de l'interface I1 telles qu'elles sont modélisées par le système S2.

20 La sortie du modèle fantôme MF1 est reliée au recaleur R1 qui compare l'estimation des variables d'état provenant du modèle fantôme MF1 et les variables d'état provenant du modèle local ML1. En cas de différence supérieure à un seuil prédéterminé, le recaleur R1 émet un message de recalage destiné au modèle fantôme MF1 et à l'extrapolateur EXT1 du système S2. Ainsi, le volume de données échangé entre les systèmes S1 et S2 est relativement réduit dans la mesure où un message de recalage n'est émis que si l'un des deux systèmes S1, S2 estime que l'autre système S2, S1 n'est plus en mesure d'estimer convenablement ces variables d'état.

Le fonctionnement du système sera mieux compris en référence à la figure 2. Pour le joueur J1, le vecteur d'état X se décompose en trois parties : X^e variable située à l'interface avec la poignée P1, X^m variable interne au modèle mécanique du joueur J1 et X^i variable d'interaction
 5 située à l'interface avec l'autre joueur. De façon analogue, la variable associée de force ou de couple F se décompose en : F^e force exercée par le joueur J1 sur la poignée P1, F^m force exercée par la pesanteur, les autres objets, d'autres joueurs éventuels, et la force F^i exercée par le joueur J1 sur le joueur J2. De manière analogue, le vecteur d'état Y du joueur J2 se
 10 décompose en Y^e , Y^m et Y^i et le vecteur associé de force de couple G se décompose en G^e , G^m , et G^i . Les deux joueurs J1 et J2 sont en contact virtuel. On a donc $X^i = Y^i$. La loi de l'action et de la réaction donne :
 $F^i + G^i = 0$.

A chaque pas de temps, l'interface I1 capte la position X_n^e et la
 15 transmet au modèle local ML1. L'interface I1 reçoit la force de consigne F_n^e en provenance du modèle local ML1 et commande son ou ses actionneurs avec la force de contre-réaction - F_n^e . De façon analogue, l'interface I2 capte la position Y_n^e et la transmet au modèle local ML2 et reçoit la force G_n^e en provenance du modèle local ML2 commande son ou
 20 ses actionneurs avec le force de contre-réaction - G_n^e .

Au début de l'instant $n+1$, le modèle local ML1 reçoit la position X_{n+1}^e de l'interface I1, l'estimation d'interaction \tilde{G}_{n+1}^i du modèle distant MD2 et les variables intrinsèques préenregistrées F_{n+1}^m . Le modèle local ML1 calcule la force exercée par le joueur J1 sur le joueur
 25 J2 : $F_{n+1}^i = \tilde{G}_{n+1}^i$, la force exercée par le joueur J1 sur la poignée P1 : $F_{n+1}^e = B^{ee-1} \{ X_{n+1}^e - X_n^e - A^e X_n - B^{em} F_{n+1}^m + B^{ei} \tilde{G}_{n+1}^i \}$, les matrices A et B étant celles de l'évolution du joueur J1 avec $\dot{X} = AX + BF$. Le modèle local ML1 calcule encore :

$$30 \quad X_{n+1}^{m,i} = X_n^{m,i} + A^{m,i} X_n + B^{m,i} \begin{bmatrix} F_{n+1}^e \\ F_{n+1}^m \\ -\tilde{G}_{n+1}^i \end{bmatrix}$$

Le modèle local ML1 envoie X_{n+1} et F_{n+1} au recaleur R1, la consigne - F_{n+1}^e à l'interface I1 et la variable de position X_{n+1}^i au
 35 modèle distant MD2.

Le modèle fantôme MF1 s'il ne reçoit pas de message du recaleur R1 calcule $\hat{F}_{n+1} = \hat{F}_n + K_1$, K_1 étant fourni par le système S2, et l'estimation de position $\hat{X}_{n+1} = (I+A)\hat{X}_n + B\hat{F}_{n+1}$, c'est-à-dire l'état mécanique du joueur J1 tel qu'il peut être prédit par le système S2. I est ici la matrice identité.

5 Sur réception d'un message de recalage $M_n = \{n, \bar{X}_n, \bar{F}_n \text{ et } \bar{F}_{n-1}\}$ en provenance du recaleur R1, le modèle fantôme MF1 effectue le recalage suivant : $\hat{X}_n = \bar{X}_n, \hat{F}_n = \bar{F}_n$ et $K1 = \bar{F}_n - \bar{F}_{n-1}$

Le recaleur R1 reçoit à chaque pas de temps n la variable de position X_n et les variables d'effort F_n et F_{n+1} en provenance du modèle local ML1, et l'estimation \hat{X}_n en provenance du modèle fantôme MF1. Il compare la valeur absolue de la différence entre la variable de position X_n et l'estimation \hat{X}_n à un seuil prédéterminé et ne fait rien si ladite valeur absolue est inférieure audit seuil. Dans le cas contraire, il compose un message de recalage $M_n = \{n, X_n, F_n, F_{n-1}\}$. Le recaleur R1 envoie le message de recalage M_n au modèle fantôme MF1 pour qu'il se recalc immédiatement et au modèle distant MD1 par l'intermédiaire de l'extrapolateur EXT1 du système S2 pour qu'il se recalc le plus tôt possible.

15 L'extrapolateur EXT2 du système S1 permet de réaliser une synchronisation. En effet, le message $M_p = \{p, Y_p, G_p, G_{p-1}\}$ émis par le recaleur R2 du système S2 arrive au système S1 à un instant compris entre n et n+ 1. Toutefois, le message M_p est estampillé par la date p en provenance du système S2. L'extrapolateur EXT2 calcule $K_2 = G_p - G_{p-1}$ et recalc le modèle distant MD2 en effectuant : $\bar{G}_p = G_p$ et $\bar{Y}_p = Y_p$ puis aux instants suivants et quel que soit :

25 $j = p, \dots, n, \bar{G}_{j+1} = \bar{G}_j + K_2 \text{ et } \bar{Y}_{j+1} = \bar{Y}_j + C\bar{Y}_j + D\bar{G}_{j+1}, C \text{ et } D \text{ étant les matrices équivalentes aux matrices } A \text{ et } B \text{ pour le joueur } J2.$ L'extrapolateur EXT2 transmet au modèle distant MD2 le résultat du recalage : $\bar{Y}_{n+1}, \bar{G}_{n+1}$ et K_2 .

Le modèle distant MD2 du système S1 se recalc sur réception d'un message en provenance de l'extrapolateur EXT2 en prenant les valeurs fournies par ledit extrapolateur EXT2 :

$$\tilde{G}_{n+1} = \bar{G}_{n+1}, \tilde{Y}_{n+1} = \bar{Y}_{n+1} \text{ et } \tilde{K}_2 = K_2$$

35 Hors réception d'un tel message, et à chaque pas de temps, le modèle distant MD2 reçoit la variable de position X_{n+1}^i en provenance du

modèle local ML1 et effectue un calcul prédictif :

$$\tilde{G}^{e,m'}_{n+1} = \tilde{G}^{e,m'}_n \tilde{K}^{e,m'}_2$$

$$\tilde{G}^i_{n+1} = D^{ii-1} \left\{ X^i_{n+1} - \tilde{Y}^i_n - C \tilde{Y}^i_n - D^e G^e_{n+1} - D^m G^m_{n+1} \right\}$$

$$\tilde{Y}^{e,m'}_{n+1} = \tilde{Y}^{e,m'}_n + C^{e,m'} \tilde{Y}_n + D^{e,m'} \tilde{G}_{n+1}$$

$$\tilde{Y}^i_{n+1} = X^i_{n+1}$$

Le modèle distant MD2 transmet au modèle local ML1 la
prédiction de variable de position relative au joueur J2 : \tilde{G}_{n+1}

De préférence, l'extrapolateur EXT2 effectue un recalage en
biseau qui permet de lisser les évolutions. Un exemple de ce recalage est
montré sur les courbes de la figure 3. Au lieu de ramener brutalement
l'estimation de la variable de position Y à la variable \tilde{Y} calculée comme
exposée ci-dessus par l'extrapolateur EXT2, le recalage est effectué en
quatre étapes entre les instants n et n+4 selon le calcul suivant :

$$k = \left\lceil \frac{|\tilde{Y}_{n+1} - \bar{Y}_{n+1}|}{\text{seuil}} + 1 \right\rceil ;$$

$$\text{Si } k = 1, \text{ alors } \tilde{Y}_{n+1} := \bar{Y}_{n+1}$$

Sinon j = n,

$$\bar{G}_{j+1} = \bar{G}_j + K2$$

$$\bar{Y}_{j+1} = \bar{Y}_j + C \bar{Y}_j + D \bar{G}_{j+1}$$

$$\tilde{Y}_{j+1} := \bar{Y}_j + C \tilde{Y}_j + D \bar{G}_{j+1}$$

$$\tilde{Y}_{j+1} = (\bar{Y}_{j+1} + (K-1)\tilde{Y}_{j+1}) / k$$

$$j := j+1$$

Si k est supérieur à 2, alors k := k-1

Sinon on sort de la boucle et $\tilde{Y}_{j+1} = \bar{Y}_{j+1}$. Le recalage en biseau
permet un fonctionnement plus doux du système, ce qui est mieux perçu
par les utilisateurs et implique moins de contraintes mécaniques.

De façon plus générale, le modèle fantôme MF1 reçoit les mêmes
données que le modèle distant MD1 de l'autre système et permet

d'effectuer la même simulation que ledit autre système. En d'autres termes, on cherche à savoir ce que l'autre système ne sait pas dans un but de recalage. Le recaleur fonctionne en aveugle par rapport à l'autre système et permet de continuer à simuler en l'absence de données pertinentes transmises par un message de recalage en provenance de l'autre système. L'extrapolateur EXT2, en particulier dans le cas du recalage en biseau, permet de tenir compte du mouvement tel que mesuré par l'autre système pendant le délai de transmission dû au réseau de communication. Dans une variante simplifiée, on peut parfaitement concevoir que l'un des deux ou les deux systèmes est dépourvu de modèle fantôme. On peut également prévoir de faire fonctionner ensemble un nombre de systèmes supérieur à deux.

Les modèles locaux représentent les modèles mécaniques des deux utilisateurs. Les modèles distants représentent une réplique distante des modèles mécaniques locaux nécessairement approchée du fait des délais de transmission via le réseau de communication des états des modèles locaux. Les modèles fantômes représentent une copie locale approchée des modèles distants. Les modèles distants et les modèles fantômes fonctionnent tous en mode prédicteur-correcteur. Les extrapolateurs effectuent une extrapolation des messages reçus avec un certain retard pour recalculer les modèles distants à la valeur de l'horloge de l'autre système. Les recalculateurs évaluent la nécessité de lancer un message de recalage sur le réseau de communication dès qu'un écart trop grand apparaît entre les modèles locaux et les modèles fantômes témoins prédictifs locaux des modèles prédictifs distants. Les recalculateurs permettent de limiter le nombre de messages émis à travers le réseau de communication pour éviter de l'encombrer. A l'intérieur d'un système, les échanges d'information peuvent être effectués à la cadence d'un khz. Entre les systèmes et donc par l'intermédiaire du réseau de communication, les échanges de message s'effectuent si l'un des recalculateurs le considère comme nécessaire.

Un mode de réalisation de l'invention destiné à l'échographie est illustré sur la figure 4. Il est prévu un système de commande S1 installé par exemple dans un établissement non spécialisé en obstétrique, dans un établissement d'une ville de petite taille, ou encore dans un véhicule pour

la desserte de zones rurales. Le système S2 est installé dans un établissement hospitalier spécialisé où des opérateurs hautement qualifiés sont disponibles pour réaliser les opérations d'échographie, par exemple dans un centre hospitalier régional ou universitaire. Une patiente J3 repose sur un lit ou une table T. Une sonde échographique SE est en contact avec son abdomen. Un tableau de réglage TR de paramètres de la sonde SE est installé à proximité. La sonde SE est relié au système S1 et transmet des données d'images échographiques audit système S1, et échange des données relatives à la position et aux effets exercés avec le système S1. Pour des raisons de clarté du dessin, le support de la sonde SE qui pourrait être un bras articulé n'a pas été représenté ici. Toutefois, on comprend qu'il s'agit d'un support permettant un déplacement dans l'espace selon plusieurs degrés de liberté, en général au moins six pour pouvoir prendre une position adaptée en contact avec l'abdomen de la patiente J3. Il est prévu un microphone MI3 et un haut-parleur HP3 relié au système S1 et permettant à la patiente de converser avec l'opérateur situé à distance. Il est encore prévu une caméra CA3 orientée vers la patiente J3 et un écran vidéo EV3 permettant à la patiente de voir soit l'opérateur situé à distance, soit des images échographiques. La caméra CA3 et l'écran vidéo EV3 sont également reliés au système S1. Les systèmes S1 et S2, outre les éléments qui ont été décrits en référence aux figures 1 et 2, comprennent chacun un multiplexeur-démultiplexeur DM1 et DM2 pour permettre la transmission de données sur le réseau 3 qui peut être par exemple de type ADSL.

Du côté du système S2, l'opérateur J4 qui pourra être un médecin spécialisé en échographie manipule une poignée P3 dont la position dans l'espace va être répliquée par la sonde SE. La poignée P3 est reliée à un bras articulé BA lui-même relié à une interface I3 du genre des interfaces I1 et I2 décrites ci-dessus et comprenant un ou plusieurs actionneurs et un ou plusieurs capteurs de position et capteurs d'effort. La mesure de l'effet peut être effectuée par une mesure d'une grandeur énergétique des actionneurs, par exemple par le courant consommé encore au moyen d'une jauge de contrainte. L'interface I3 est relié au système S2.

Il est encore prévu une caméra CA4 dirigée vers l'opérateur J4 et dont les images pourront être affichées sur l'écran EV3, un microphone

5 MI4 et un haut-parleur HP4 permettant à l'opérateur J4 de converser avec la patiente J3. Ces éléments sont reliés au système S2. Un écran vidéo EV4 de grande dimension permettra d'afficher simultanément une pluralité d'images, par exemple une image échographique, une image du visage de la patiente J3 et une image montrant le positionnement de la sonde SE sur l'abdomen de la patiente.

REVENDICATIONS

1. Système de commande (S1) d'un élément à retour d'effort (I1) apte à interagir avec un autre élément (I2), du type à constante de temps inférieure à celle liée à une commande à distance, caractérisé par le fait qu'il comprend un modèle local (ML1) pour le calcul d'une consigne (F) destinée à l'élément à retour d'effort à partir d'une variable (X^e) mesurée par l'élément à retour d'effort, de variables intrinsèques (F^m) à l'élément à retour d'effort et d'une estimation (\tilde{G}) d'une interaction extérieure sur l'élément à retour d'effort, et d'une variable d'état ($X^{m,i}$) de l'élément à retour d'effort, un modèle distant (MD1) pour l'estimation des interactions et des variables d'état de l'autre élément avec mise à jour lors de la réception de données reçues d'un autre système (S2) situé à distance, et un moyen de recalage (R1) apte à émettre un message de recalage (M_n) vers ledit autre système.

2. Système selon la revendication 1, caractérisé par le fait qu'il comprend un modèle fantôme (MF1) pour effectuer une estimation (\hat{X}, \hat{F}) des variables d'état de l'élément à retour d'effort et recalcr ladite estimation à réception du message de recalage.

3. Système selon la revendication 2, caractérisé par le fait que le moyen de recalage (R1) comprend un moyen de comparaison de l'estimation des variables d'état provenant du modèle fantôme et de variables d'état provenant du modèle local de façon qu'en cas de différence supérieure à un seuil prédéterminé, le moyen de recalage émette un message de recalage vers le modèle fantôme (MF1) et vers l'autre système (S2).

4. Système selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé par le fait qu'il comprend un moyen d'extrapolation (EXT 2) pour traiter un message de recalage provenant de l'autre système et pour mettre à jour le modèle distant.

5. Ensemble de commande de deux éléments distants, chaque élément étant pourvu d'un système de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes.

6. Procédé de commande d'un élément à retour d'effort apte à interagir avec un autre élément, dans lequel :

- on effectue une modélisation locale pour obtenir une consigne destinée à l'élément à retour d'effort à partir d'une variable mesurée par ledit élément à retour d'effort, de variables intrinsèques audit élément à retour d'effort, d'une estimation d'une interaction extérieure sur l'élément à retour d'effort, et d'une variable d'état de l'élément à retour d'effort;
 - on effectue une modélisation distante des interactions et des variables d'état de l'autre élément avec mise à jour lors de la réception de données reçues d'un autre système situé à distance;
 - on élabore et on émet vers ledit autre système un message de recalage.
7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel on effectue une modélisation fantôme des variables d'état de l'élément à retour d'effort avec recalage à réception du message de recalage.
8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel lors du recalage, on compare l'estimation de variables d'état issues de la modélisation fantôme et de variables d'état issues de la modélisation locale de façon qu'en cas de différence supérieure à un seuil prédéterminé, on émette un message de recalage en vue d'une nouvelle modélisation fantôme, et vers l'autre système.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, dans lequel on effectue une extrapolation pour traiter un message de recalage provenant de l'autre système et effectuer une mise à jour de la modélisation distante.
10. Programme d'ordinateur comprenant des moyens de code-programme pour mettre en oeuvre les étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 9, lorsque ledit programme fonctionne sur un ordinateur.
11. Support capable d'être lu par un dispositif de lecture de moyens de code-programme qui s'y trouvent stockés et qui sont aptes à la mise en oeuvre des étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 9, lorsque ledit programme fonctionne sur un ordinateur.

FIG.1

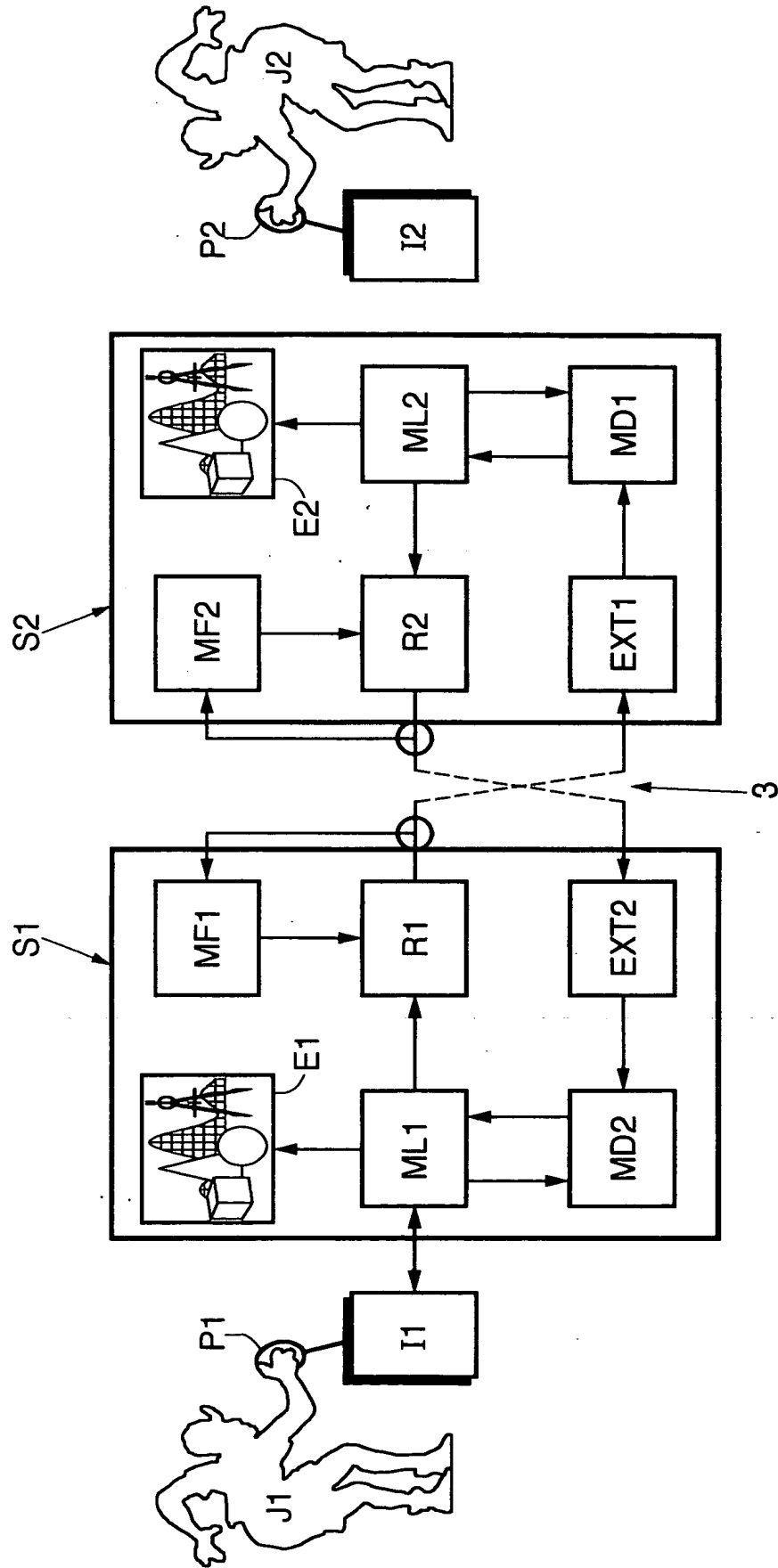


FIG.2

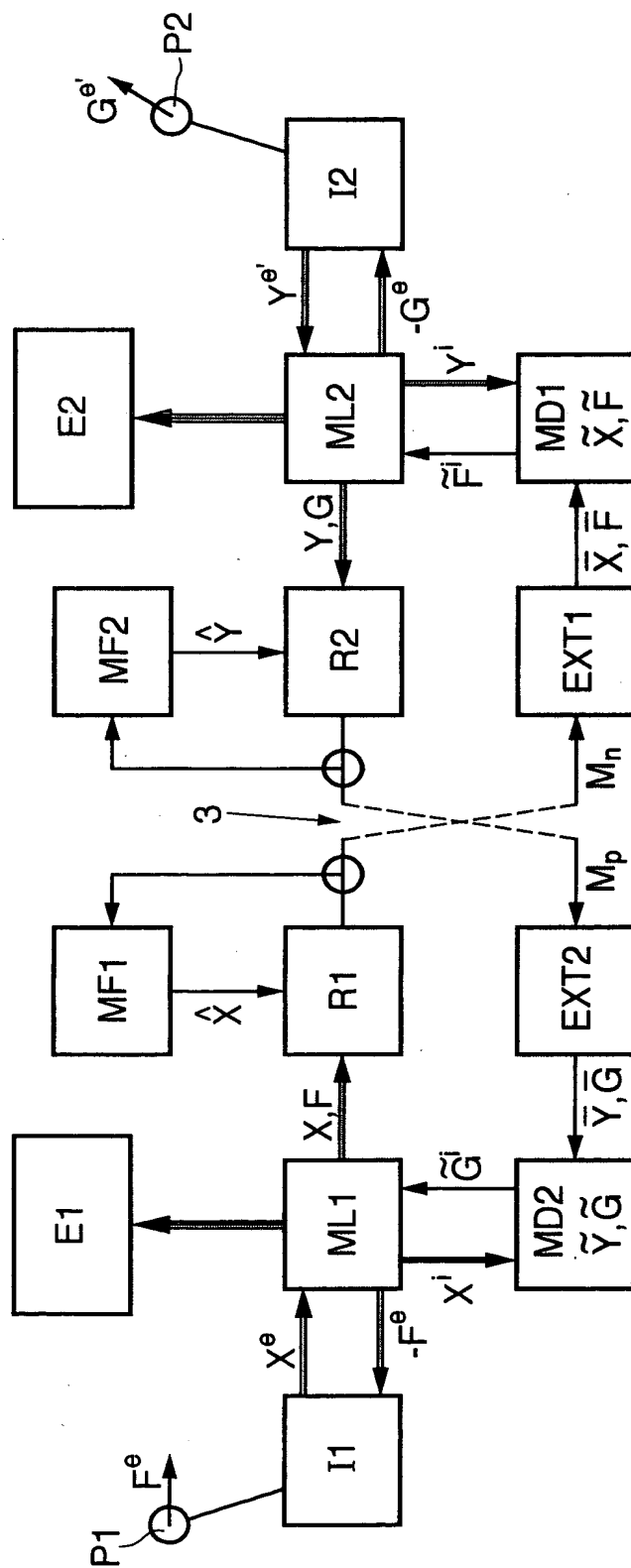


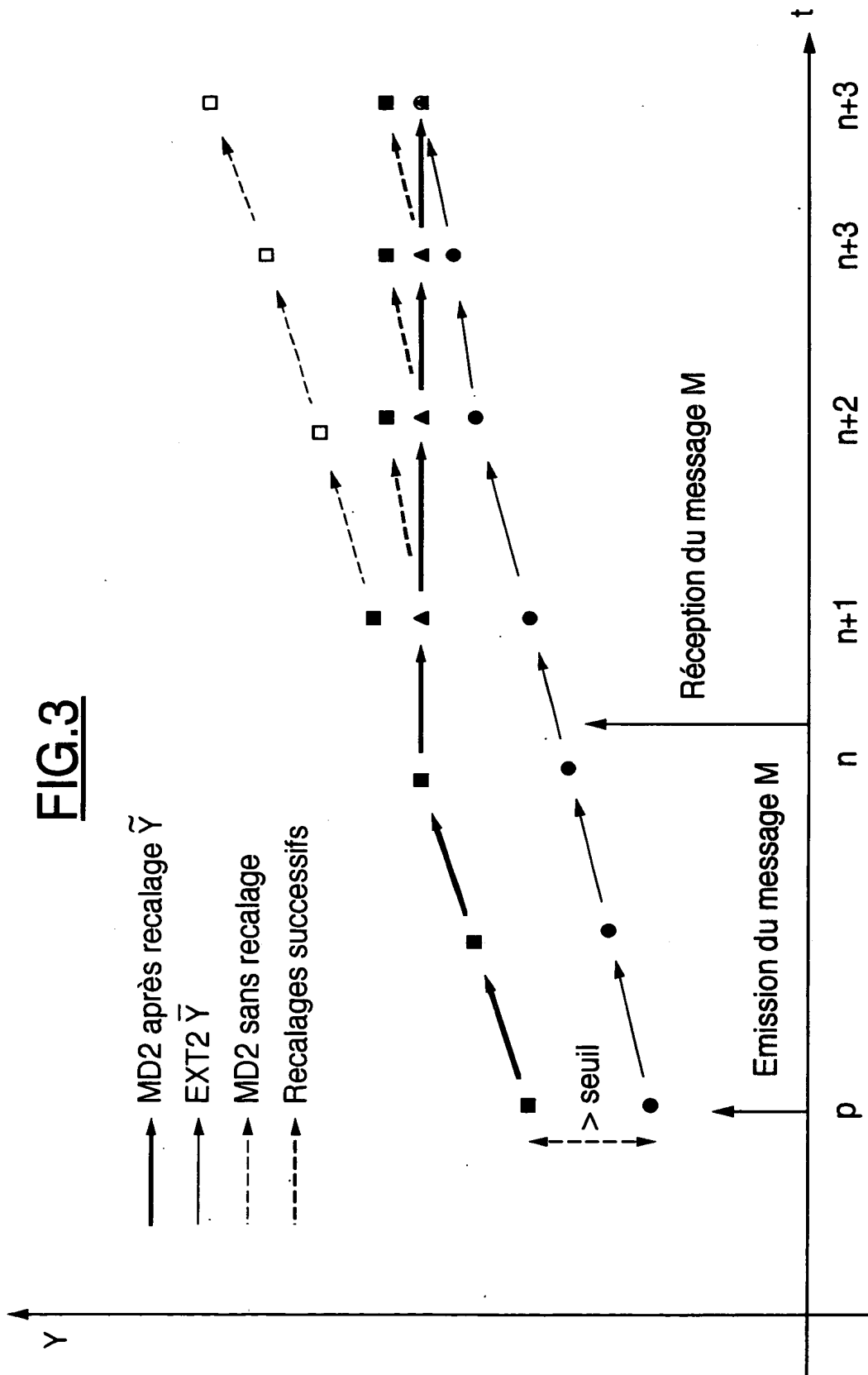
FIG.3

FIG. 4

